

胡创业, 赵晓博, 张保涛, 等. 综合地球物理方法在莱芜地区富铁矿深部找矿中的应用[J]. 华北地震科学, 2024, 42(4): 51-57. doi:10.3969/j.issn.1003-1375.2024.04.008.

HU Chuangye, ZHAO Xiaobo, ZHANG Baotao, et al. Application of Integrated Geophysical Method in Deep Ore Prospecting of Iron Rich Deposits in Laiwu Area[J]. North China Earthquake Sciences, 2024, 42(4): 51-57. doi:10.3969/j.issn.1003-1375.2024.04.008.

# 综合地球物理方法在莱芜地区富铁矿深部找矿中的应用

胡创业<sup>1,2</sup>, 赵晓博<sup>1</sup>, 张保涛<sup>1</sup>, 胡兆国<sup>1</sup>, 郑岩岩<sup>1,2</sup>, 陈琦<sup>1,2</sup>, 杜利明<sup>1,2</sup>

(1. 中国冶金地质总局山东正元地质勘查院, 济南 250013;

2. 山东省地球物理学会深部探测综合地球物理技术工程实验室, 济南 250013)

**摘要:** 根据高精度航空磁测成果结合以往地质勘查资料分析,在张家洼铁矿Ⅲ矿床西北侧的冶庄地区,有一处向北凸起的低缓分支磁异常,推断为隐伏磁性体引起的反应,具有较好的找矿潜力;选取区内的典型剖面,综合利用地质、高精度磁法、重力、可控源音频大地电磁法等资料,开展了重、磁、电剖面联合精细反演,推断了奥陶纪碳酸盐岩地层与中生代闪长岩体接触带的空间展布特征以及隐伏矿体的主要赋矿带;结合已知地质资料综合研究认为,闪长岩体局部突起倾角较小的一侧是赋存隐伏铁矿床的有利位置。通过钻探验证,揭露的深部盲矿体位置与预测结果基本一致,证明综合地球物理方法在莱芜地区富铁矿深部找矿中效果突出,为在该地区进一步开展富铁矿的深部勘探工作提供有价值的参考。

**关键词:** 深部找矿; 矽卡岩型铁矿; 航空磁测; 重磁电联合反演; 找矿预测; 莱芜地区

**中图分类号:** P618

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1003-1375 (2024) 04-0051-07

doi:10.3969/j.issn.1003-1375.2024.04.008

## 0 引言

莱芜地区是中国重要的矽卡岩型富铁矿产区,经过 60 多年的地质勘查工作,已发现富铁矿(点) 30 余处,累计查明铁矿石量近 6.2 亿 t<sup>[1]</sup>。区内的张家洼铁矿是目前山东省内已发现的最大矽卡岩型铁矿床,截至 2016 年底,累计查明铁矿石资源储量 1.265 亿 t<sup>[2]</sup>,矿区及周边开展了大量的区域地质调查、区域矿产调查、区域物化探、矿产勘查及其他研究性工作,地质工作种类齐全,研究程度较高。但以往的勘查工作主要研究和验证较强的磁异常,对低缓磁异常的评价及综合地球物理方法的应用研究较少<sup>[3]</sup>。近期,中国冶金地质总局山东正元地质勘查院在山东莱芜铁矿矿集区开展了 1:10 000 低飞航磁工作,探讨了区内深部及外围的成矿潜力。根据航磁资料显示,在张家洼铁矿Ⅲ矿床西北侧的冶庄地区,有一处向北凸起的低缓分支磁异常,结合以往地质勘查资料综合分析,初步推断为

隐伏磁性体引起的反映。在该异常区开展了综合地球物理方法研究工作,建立了典型剖面重磁电联合反演模型,预测了深部隐伏矿体的位置。经钻探验证,揭露了深部的盲矿体,取得了良好的找矿效果。

## 1 地质概况

研究区位于莱芜市区北部,位于张家洼铁矿床的深部和外围(图 1)。通过分析基岩地质图和钻孔的揭露情况,地层由老至新为:寒武纪长清群、寒武—奥陶纪九龙群、奥陶纪马家沟群、石炭—二叠纪月门沟群、二叠纪石盒子群、第四系,其中奥陶纪马家沟群的碳酸盐系是本区矽卡岩型铁矿的近矿围岩。研究区内岩浆岩为燕山期沂南序列东明生单元中细粒辉石闪长岩(矿山岩体)的北延部分,矿山岩体是该地区的主要成矿岩体。矿山岩体受到矿山弧形背斜控制,岩体侵入于该背斜的核部,整个岩体呈一向东南突出的新月状展布,其南北两端

收稿日期:2023-04-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2903702);中国冶金地质总局科研项目(中冶地[2023]CMGBDZYJ003号)

第一作者简介:胡创业(1991—),男,山东济宁人,工程师,主要从事深部地球物理探测应用研究工作。E-mail:

1051910794@qq.com





表 1 莱芜地区岩(矿)石密度统计表  
Table 1 Statistical table of rock physical properties in Laiwu area

岩性	块数	密度/(g/cm <sup>3</sup> )		磁化率 $\kappa/(10^{-6} \cdot 4\pi\text{SI})$		剩磁 $J_r/(10^{-3}\text{A/m})$		电阻率/( $\Omega \cdot \text{m}$ )	
		范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
围岩	45	2.30~2.83	2.72	0~850	106	0~510	71	56~1 657	638
矽卡岩	36	3.05~3.24	3.12	0~12 150	2 420	0~20 200	2 340	106~251	171
岩体	52	2.65~2.87	2.78	0~15 000	1 630	0~1 000	300	796~1 488	904
磁铁矿	24	3.80~4.32	4.00	12 430~216 100	216 100	8 400~56 700	56 700	13~142	43

注:物性资料,引自该地区以往铁矿普查报告和本次实测数据

范围。各类岩(矿)石的磁性可分为中高磁性和强磁性岩石 2 类。中生代闪长岩体的磁性随着铁镁质矿物含量的增加而增大表现为中高磁性特征,磁化率平均值为  $1\,630 \times 10^{-6} \cdot 4\pi\text{SI}$ 、剩余磁化强度平均值为  $300 \times 10^{-3}\text{A/m}$ ,明显高于沉积围岩;矽卡岩型铁矿体表现为强磁性特征,磁化率平均值为  $216\,100 \times 10^{-6} \cdot 4\pi\text{SI}$ 、剩余磁化强度平均值为  $56\,700 \times 10^{-3}\text{A/m}$ ,总体磁化率和剩余磁化强度均明显高于闪长岩体。闪长岩体的规模明显要远大于矽卡岩型铁矿的规模。因此,磁异常高值区主要为闪长岩体的反映,矽卡岩型铁矿埋深大、厚度薄,磁场特征表现为闪长岩体磁异常之内的局部叠加异常。

### 2.1.2 密度特征

据以往资料统计,第四系密度小于  $2.6\text{ g/cm}^3$ ,常见值在  $2.0\text{ g/cm}^3$  左右;奥陶纪马家沟群北庵庄组、五阳山组和八陡组的岩石密度变化区间在  $2.30 \sim 2.73\text{ g/cm}^3$ ,常见值为  $2.72\text{ g/cm}^3$ ;中生代燕山期闪长岩的密度平均值  $2.78\text{ g/cm}^3$ ;磁铁矿的密度普遍大于  $3.8\text{ g/cm}^3$ ,常见值在  $4.0\text{ g/cm}^3$  左右。由此可见,磁铁矿和围岩之间存在一明显的密度界面。只要磁铁矿具有一定规模,就能在地表产生相应的重力异常<sup>[1]</sup>。

### 2.1.3 电性特征

根据以往工作资料,区内第四系岩性主要为粘土、粉质粘土,电阻率值较低,一般在  $10 \sim 40\ \Omega \cdot \text{m}$  之间;奥陶系灰岩的电阻率变化较大,变化范围在  $50 \sim 1\,600\ \Omega \cdot \text{m}$  之间,究其原因,主要与灰岩的含水性相关,含水性越强会导致灰岩的电阻率降低;闪长岩体表现为相对高阻,电阻率值在  $800 \sim 1\,500\ \Omega \cdot \text{m}$  之间。从物性参数上看,围岩和岩体电阻值变化范围有交叉,没有明显的电阻率差异。但实际上,张家洼矿区周边地下水、岩溶发育,灰岩富水性较强,灰岩表现为相对低阻特征,反映到电阻率断面图上,岩体和围岩的接触带表现为条带状的高低阻梯

级带,这就为推断奥陶纪碳酸盐地层与中生代闪长岩体接触带的空间展布特征提供了依据<sup>[12]</sup>。

## 2.2 研究区重力和磁场特征

重力异常( $\Delta g$ )的变化特征显示为在东南方向重力相对较高,在北西方向重力相对较低(图 2),这反映了区域范围内燕山期侵入岩的分布以及盆地内沉积地层由南东向北西逐渐变厚的现象。重力异常的梯度带受矿山岩体边缘的控制, $\Delta g$ 一般在  $(50 \sim 35) \times 10^{-5}\text{m/s}^2$  之间。重力高异常一般呈透镜状,数值在  $(50 \sim 59) \times 10^{-5}\text{m/s}^2$  之间,主要分布在张家洼一带,反映了燕山期矿山岩体的露头情况、走向和倾角。重力低异常一般呈条带状,数值在  $(35 \sim 34) \times 10^{-5}\text{m/s}^2$  之间,主要分布在岩体的西侧,反映了盆地沉积中心的特征。矿山岩体北部重力等值线向北西向弯曲,反映了该地段为泰莱盆地西边缘转折部位。矿山岩体北部在布格重力等值线图上表现为在等值线高值区附近,在张家洼矿床处具有梯级带的波动;在港里矿床北部明显向西北向同向弯曲,反映了矿山岩体在该处向北西方向扭曲,该地段重力等值线同向弯曲梯度变化较缓,反映了矿山岩体沿港里—冶庄—口镇方向侵入。

根据研究区的航磁异常等值线平面图(图 3)显示,该区存在 4 个明显的磁异常,这 4 个异常都是正磁场背景之上的叠加升高异常,形状规则,组合成“人”字型。张家洼异常呈椭圆形,走向近 NW,以  $350\text{ nT}$  等值线进行界定,具有约  $1\,450\text{ m}$  的长度和约  $950\text{ m}$  的宽度;最大异常值为  $660\text{ nT}$ ,最小异常值为  $240\text{ nT}$ ;异常的北西部梯度变化较陡为  $0.80\text{ nT/m}$ ,南东部梯度的变化较缓为  $0.38\text{ nT/m}$ 。小官庄异常呈长椭圆形,走向近 NE,以  $300\text{ nT}$  等值线进行界定,具有  $2\,400\text{ m}$  的长度和  $1\,300\text{ m}$  的宽度,最大异常值为  $590\text{ nT}$ ,最小异常值为  $140\text{ nT}$ 。港里异常呈椭圆形,走向近 NNE,约长  $1\,200\text{ m}$ ,宽约  $800\text{ m}$ ,最大异常值为  $620\text{ nT}$ 。冶庄异常呈不规则椭圆形,北

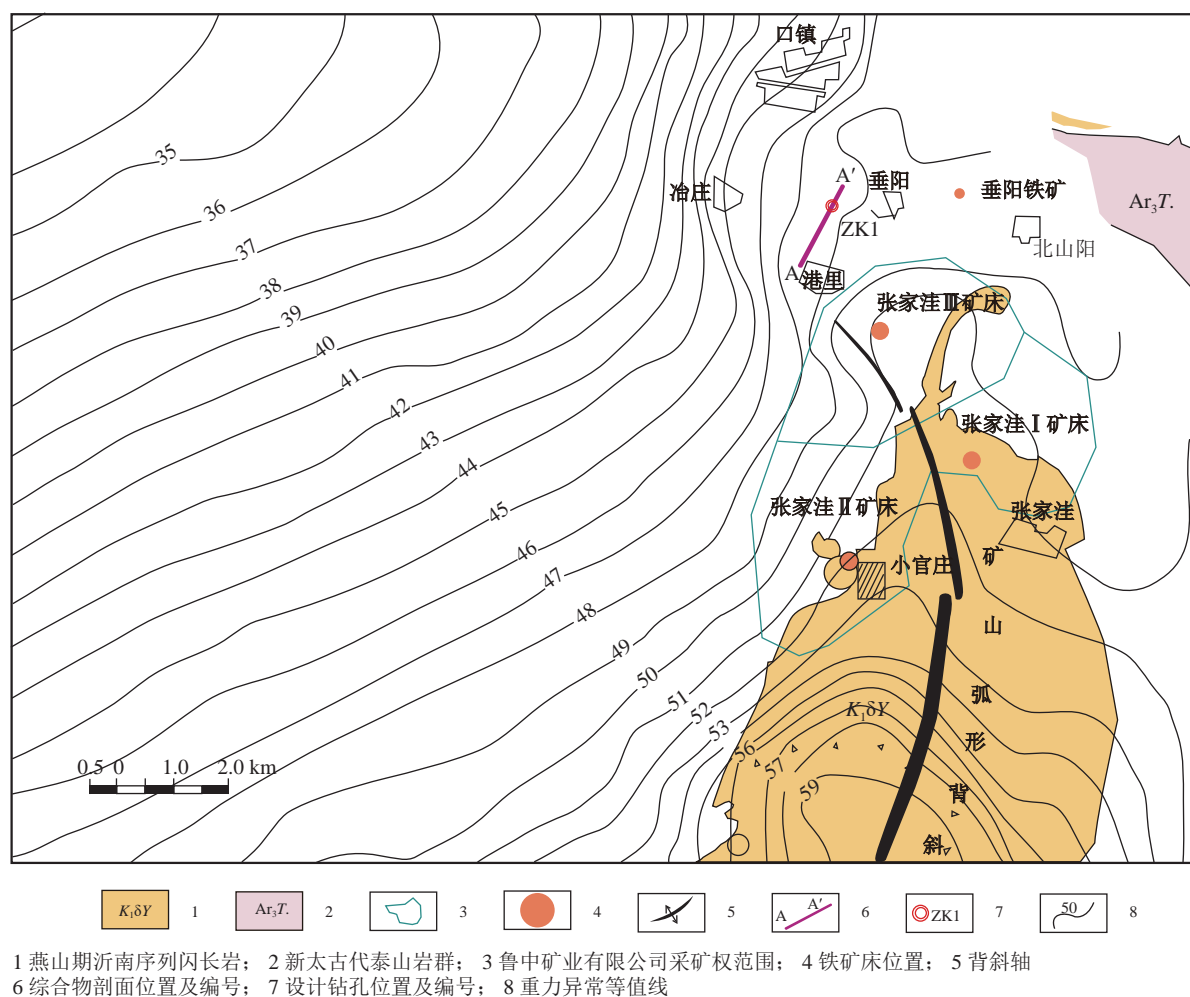


图2 研究区布格重力异常等值线平面图

Fig. 2 Bouguer gravity anomaly contour map of the study area

部具有外凸分枝异常,异常强度介于  $140\sim 280$  nT 之间,整体上呈现低缓的特征,与港里异常相似,推测可能是其北延部分。根据之前的资料分析,张家洼铁矿体位于矿山弧形背斜的两翼转折、狭缩收敛部位,由于两翼挤压作用,矿液向倾伏端流动,同时形成了一个封闭的容矿空间,易于矿液集中交代,因此易于发生成矿作用<sup>[13]</sup>。

### 3 找矿预测验证

#### 3.1 地球物理场与铁矿床关系

经验证张家洼异常、小官庄异常、港里异常 3 个异常分别对应张家洼铁矿的 I 矿床、II 矿床、III 矿床 3 个矿段。说明研究区内地球物理特征与铁矿床有着密切的联系,铁矿体发育的位置显示有“重磁同高”的特征。冶庄异常与港里异常具有相似性,推测为矿山岩体的北延部分,具有有利的成矿地质条件。同时,该区以往的物探工作表明,通过可控源音频大地电磁反演得到的电阻率剖面

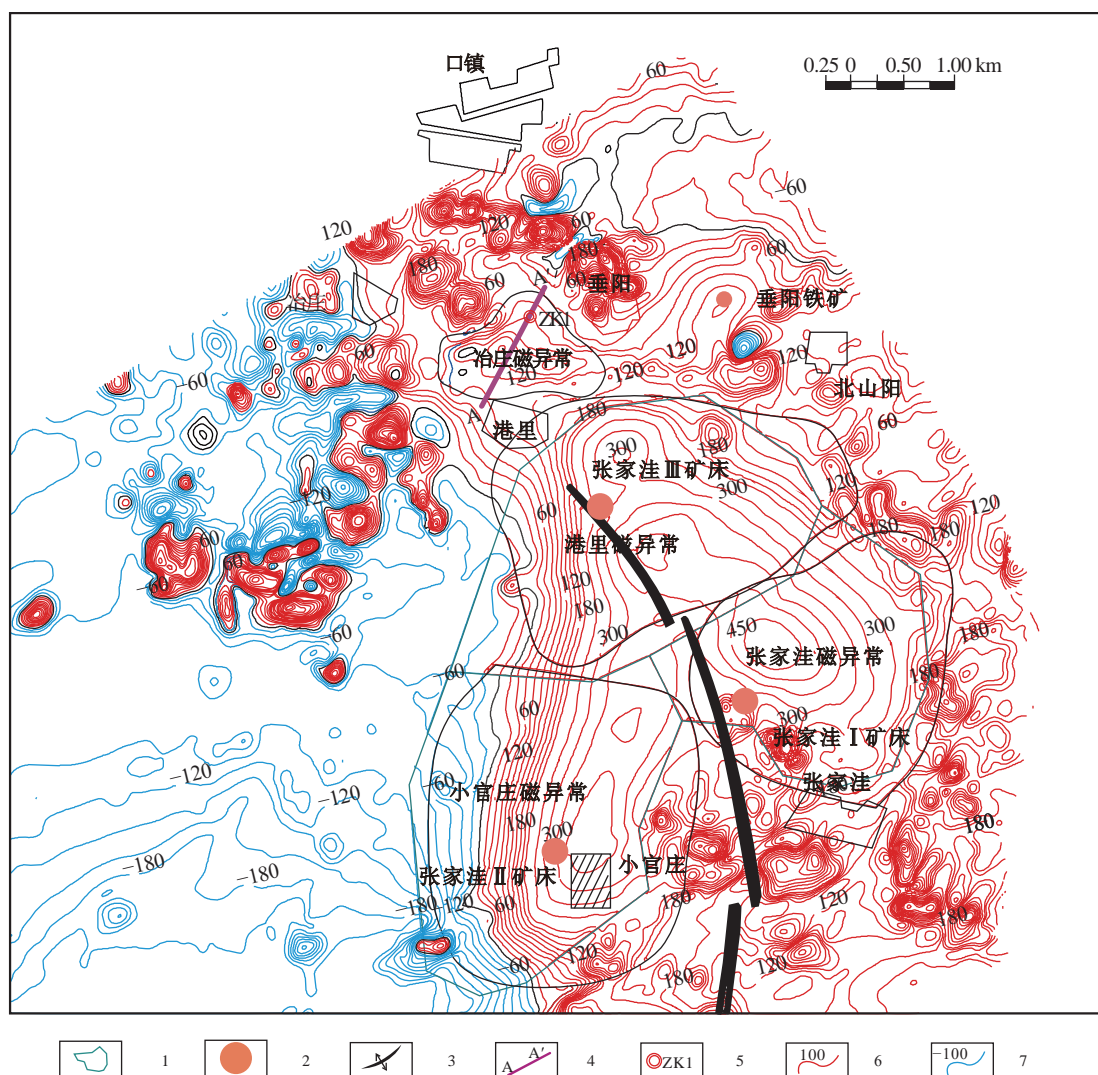
图对闪长岩体的顶界面、碳酸盐岩地层和岩体的接触带有较好识别能力,而接触带正是莱芜地区富铁矿成矿的有利部位。因此,在冶庄地区开展高精度磁法、重力和可控源音频大地电磁法相结合的综合地球物理方法,来寻找深部隐伏的富铁矿是十分必要的。

#### 3.2 典型剖面重磁电联合反演模型及靶区预测

总结该区铁矿床分布和地球物理场之间的关系,在岩体边部及岩体内部正磁场背景下的升高异常可能为矿致异常,在重力异常梯度带、重力场局部抬升的部位对铁矿有一定指示意义,电阻率高低阻的梯级带是寻找深部隐伏铁矿体的间接找矿标志。根据以上分析,在冶庄异常范围区内布设  $A-A'$  剖面作为典型剖面进行研究,预测深部找矿靶区。

本次研究利用  $1:10\,000$  航空磁测资料切制磁剖面数据,结合实测的重力剖面以及 CSAMT 数据,进行地球物理联合反演<sup>[14-19]</sup>,获得  $A-A'$  剖面的重磁电综合地球物理模型,并推测奥陶纪碳酸盐岩地层





1 鲁山矿业有限公司采矿权范围; 2 铁矿床位置; 3 背斜轴; 4 物探综合剖面位置及编号;  
5 设计钻孔位置及编号; 6 正磁异常等值线; 7 负磁异常等值线

图 3 研究区航磁异常等值线平面图

Fig. 3 The aeromagnetic anomaly contour map of the study area

与中生代闪长岩体接触带的空间展布特征及找矿靶区。

图 4 显示, 地表至埋深-1 000 m 以浅大致分为 3 层, 第一层从地表至-200 m 深度推断为第四纪(Q)粘土、砂层和古近纪(E)泥岩、砂岩, 该层电阻率整体呈现低阻特性。第二层推断为二叠纪(P)泥岩、页岩、砂岩、煤层, 石炭纪(C)砂岩、灰岩、煤层, 奥陶纪(O)灰岩、白云岩, 该层电阻率整体呈现相对中高阻特征。该层位受下部闪长岩岩体隆起影响, 顶界面有一定的起伏。第三层推断为燕山中期闪长岩岩体, 整体呈相对高阻特征。根据电阻率高低阻梯级带的形态推断了碳酸盐岩地层与岩体的空间展布特征, 岩体向北东方向延伸且深度逐渐变大, 在剖面长度 700~950 m 处, 岩体出现局部凸

起, 以剖面长度 900 m 处为鞍部, 南西侧较北东侧坡度较陡。

为确定验证孔位, 对该剖面重、磁异常进行了精细的等效模拟正、反演计算, 正反演结果显示在剖面长度 730~850 m 之间有较大可能存在隐伏磁性体, 该位置正对应推断的岩体局部凸起的缓坡一侧。根据前文所述的规律并结合勘探资料, 将剖面长度 730~850 m, 深度 520~560 m 的范围推断为成矿有利位置。本次设计 ZK1 钻孔(设计深度 650 m)对预测的找矿靶区进行验证。

### 3.3 预测结果验证

根据本次设计施工的 ZK1 钻孔, 实际钻进至 600 m 终孔, 在 537.7~552.2 m 深度见磁铁矿矿体, 矿体厚度 14.5 m, TFe 品位在 55% 以上。验证情况

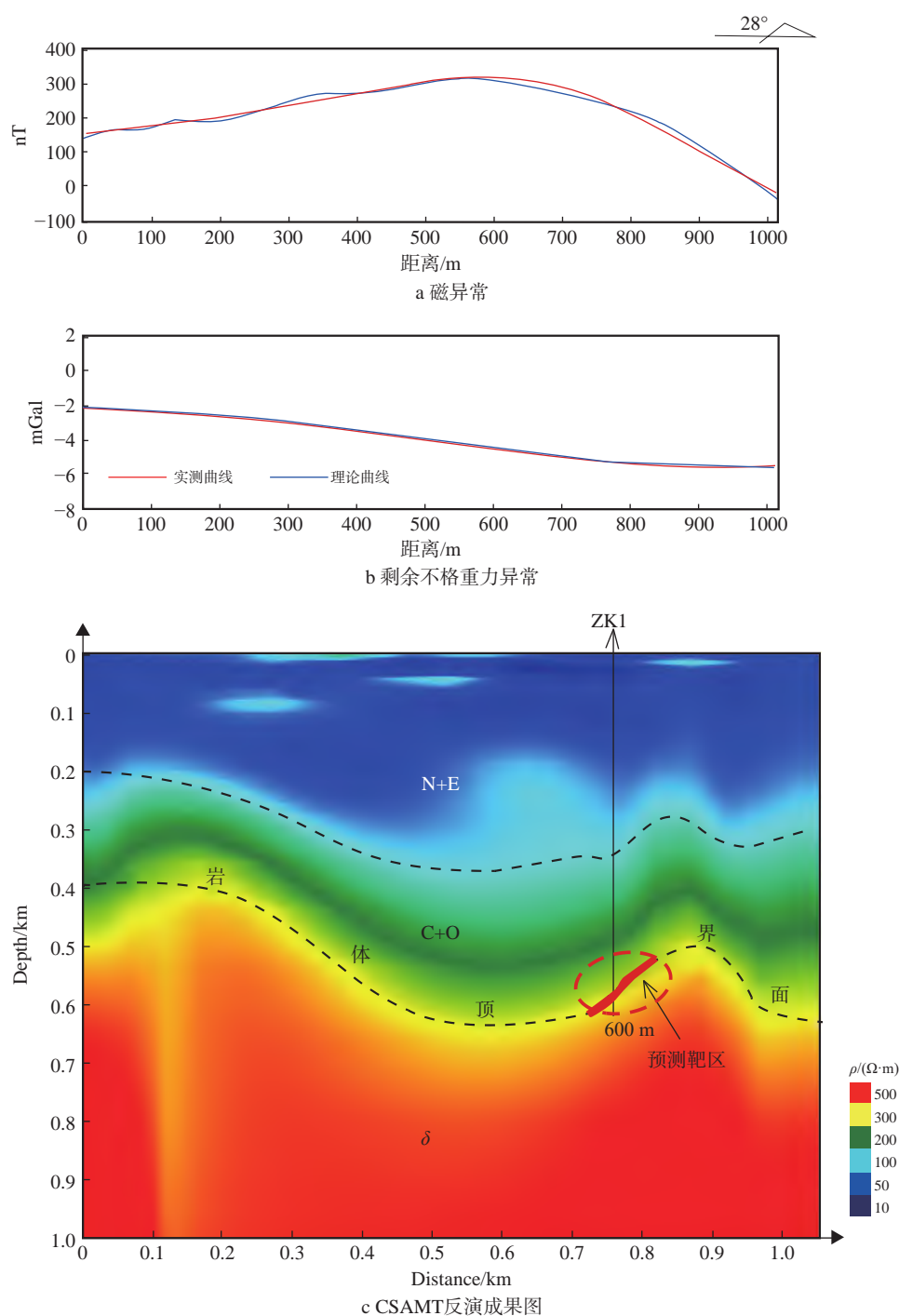


图4 A—A'剖面重磁电联合反演地质-地球物理模型

Fig. 4 Geologic-geophysical model of gravity-magnetic-electric joint inversion in A-A' Profile

证实冶庄异常确为矿致异常, 隐伏的盲矿体在本次预测的局部找矿靶区范围内, 矿体的赋存位置和预测结果基本一致, 也预示着冶庄异常具有进一步的深部找矿潜力。

#### 4 结论

1) 研究区内地球物理特征与铁矿床关系密切, 在岩体边部及岩体内部正磁场背景下的升高异常、

局部凸起的分支异常, 低重力异常背景下的局部相对高重力异常是寻找隐伏铁矿体的有利位置; 岩体与围岩的接触带对应电阻率等值线由低到高的梯级带, 即中生代闪长岩体一侧电阻率高, 奥陶纪碳酸盐岩地层一侧电阻率低。

2) 地球物理异常对建立研究区地质—地球物理找矿模型、深部找矿预测起到重要作用, 预测在A—A'剖面磁异常、剩余布格重力异常曲线局部抬

升,电阻率等值线局部凸起之间的鞍部及局部突起的缓坡一侧为成矿有利部位,并圈定找矿靶区,经验证效果良好。

3)本次找矿实践证明,结合已有的地质信息,采用综合地球物理方法来研究局部低缓磁异常是否是矿致异常是一种有效的手段;以高精度磁法为

主,加之重力测量、可控源音频大地电磁测深是莱芜地区富铁矿深部找矿的有效方法技术组合。

**致谢** 在成文过程中,审稿专家对该文的修改和完善提出了宝贵的意见和建议,在此一并表示感谢!

#### 参考文献:

- [1] 马明,高继雷,高明波,等.鲁西莱芜地区地球物理特征及富铁矿床勘查模型建立[J].华北地震科学,2020,38(2):13-20.
- [2] 彭方思.山东矿产资源现状与对策分析[J].山东国土资源,2005,21(12):39-43.
- [3] 田文法,郝俊杰,严加永,等.综合地球物理方法在邢式铁矿深部找矿中的应用[J].地球物理学进展,2010,25(4):1442-1452.
- [4] 万渝生,刘敦一,王世进,等.华北克拉通鲁西地区早前寒武纪表壳岩系重新划分和BIF形成时代[J].岩石学报,2012,28(11):3457-3475.
- [5] 王世进,万渝生,张成基,等.鲁西地区早前寒武纪地质研究新进展[J].山东国土资源,2008,24(1):10-20.
- [6] 李洪奎,杨永波,耿科,等.山东重大基础地质问题研究进展[J].岩石学报,2013,29(2):594-606.
- [7] 宗信德,李卫,赵宏生,等.山东莱芜接触交代-热液铁多因素成矿及特征[J].地质与资源,2011,20(5):370-375.
- [8] 韩璧.山东莱芜含矿岩体成因及其与铁矿的关系[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
- [9] 郝兴中.鲁西地区铁矿成矿规律与预测研究[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
- [10] 郝兴中,刘伟,臧凯,等.鲁西潘店地区矽卡岩型铁矿成矿规律初探[J].山东国土资源,2018,34(7):27-33.
- [11] 杜瑞庆.深部铁矿勘探的地球物理找矿模式研究-以河南省某铁矿为例[D].北京:中国地质大学(北京),2013.
- [12] 贺春艳,郭秋峰,张超,等.综合物探在寻找矽卡岩型矿床中的应用[J].山东国土资源,2012,28(1):27-30.
- [13] 沈立军,朱裕振,高志军.山东齐河-禹城富铁矿李屯岩体地质特征初探[J].山东国土资源,2020,36(2):23-29.
- [14] 李倩,李建国,王万银,等.重磁电联合勘查深部铁矿方法试验研究[J].工程地球物理学报,2015,12(2):218-224.
- [15] 郭继颂,刘志远,李达,等.综合物探方法在承德某多金属矿勘探中的应用[J].工程地球物理学报,2012,9(3):356-361.
- [16] 刘光鼎,郝天珩.应用地球物理方法寻找隐伏矿床[J].地球物理学报,1995,38(6):850-854.
- [17] 王涛.磁法与可控源音频大地电磁法二维联合反演研究[D].北京:中国地质大学(北京),2016.
- [18] 朱德朋.磁法与大地电磁法数据二维联合反演研究[D].北京:中国地质大学(北京),2015.
- [19] 闫政文,谭捍东,彭森,等.基于交叉梯度约束的重力、磁法和大地电磁三维联合反演[J].地球物理学报,2020,63(2):736-752.

## Application of Integrated Geophysical Method in Deep Ore Prospecting of Iron Rich Deposits in Laiwu Area

HU Chuangye<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiaobo<sup>1</sup>, ZHANG Baotao<sup>1</sup>, HU Zhaoguo<sup>1</sup>, ZHENG Yanyan<sup>1,2</sup>, CHEN Qi<sup>1,2</sup>, DU Liming<sup>1,2</sup>

(1. Geological Exploration Institute of Shandong Zhengyuan, Jinan 250013, China;

2. Engineering Laboratory of Comprehensive Geophysical Technology for Deep Exploration, Jinan 250013, China)

**Abstract:** According to the high-precision aeromagnetic survey results combined with the analysis of previous geological exploration data, there is a low, gentle branching magnetic anomaly that bulges northward in the Yezhuang area on the northwest side of the Zhangjiawa iron ore deposit III. This anomaly is inferred to be a reflection caused by a concealed magnetic body and shows significant potential for mineral prospecting. Combining geological, gravitational, magnetic, and controlled-source audio-frequency magnetotelluric data, typical profiles are selected for the joint fine inversion of gravity, magnetic and electric data. Based on the inversion result, the spatial distribution characteristics of the contact zone between the Ordovician carbonate strata and the Mesozoic diorite bodies and the main ore-hosting zones of the hidden ore bodies are inferred. Combined with the known geological data, it is believed that the gentle slope side of the local protrusion of the rock mass is a favorable area for finding hidden ore. The drilling verification shows that the revealed deep blind ore bodies are basically consistent with the predicted results, which proves that the comprehensive geophysical method has an outstanding effect in the deep prospecting of the iron-rich ore in Laiwu area, and provides a reference for deep ore prospecting of the iron-rich ore in this area in the future.

**Keywords:** deep prospecting; Skarn-type iron ore; aeromagnetic survey; gravity-magnetic-electric joint inversion; prospecting forecast; Laiwu area